IEEE 802.15.4 시스템을 위한 프레임 동기 및 주파수 옵셋 추정 기법

이은진, 오혁준
광운대학교 전자통신공학과 (grigo22@kw.ac.kr)

Frame Synchronization and Frequency Offset estimation for IEEE 802.15.4

Eun J. Lee and Hyuk J. Oh
Department of Electronics and Communications Engineering,
Kwangwoon University

요약

본 논문에서는 주파수 오차가 큰 IEEE 802.15.4 시스템에서의 프레임 동기 및 주파수 추정기법을 제안한다. 주파수 오차의 영향을 제거하기 위해 coherent 방식이 아닌 non-coherent 방식의 프레임 동기가 요구된다. 차등 신호와 절대값을 이용하여 주파수 옵셋의 영향을 완벽히 제거한 프레임 동기를 제안하였다. 그리고 주파수 옵셋 추정의 분산을 줄이기 위한 over-sampling 주기의 주파수 옵셋 검출 기법을 제안하였다.

I. 서론

IEEE 802.15.4 시스템은[1] O-PSK 변조방식을 사용하며 전송률이 250kbps 인 2.4GHz 대역과 40kbps 인 915MHz 대역, 20kbps 인 868MHz 대역이 있다.

본 논문에서는 ISM(Industrial, Scientific and Medial) 대역인 2.4GHz 대역의 ZigBee 시스템을 위한 프레임 동기 및 주파수 추정 기법을 제안하였다. IEEE 802.15.4 시스템 규격이 권고하는 주파수 옵셋은 송수신단 각각 ± 40ppm 으로 시스템 설계시 주파수 옵셋에 강건한 동기화 기법이 요구된다. 일반적인 coherent 방식의 프레임 동기화 기법을 사용할 경우 주파수 옵셋의 영향에 의해 프레임의 시작점을 추정할 수가 없다. 여기서는 수신신호의 차등값을 이용하여 주파수 옵셋이 제거된 신호로 preamble 간의 correlation 을 이용한 프레임 동기화 기법을 제안 하였다. 그리고 주파수 옵셋이 큰 시스템 특성에 따라 일반적인 chip rate 의 주파수 옵셋 추정이 아닌 over-sampling 주기로 주파수 추정기법을 제안하였다.

II. 프레임 동기

IEEE 802.15.4 시스템은 O-QPSK 변조방식을 사용하며, DSSS 방식을 사용하는데, 4 비트가 32chip 의 PN 로 확산된다. 수신신호는 식(1)과 같다.

$$r_{n,i} = \sigma_{agc}\sqrt{\frac{E_c}{T_c}}\sum_{k=-\infty}^{\infty}[d_{n,i}^{i}\,p(T_c(\frac{i}{M}+n)-2kT_c)+ jd_{n,i}^{q}\,p(T_c(\frac{i}{M}+n)-2kT_c-\frac{\pi}{2})]e^{j2\pi\Delta fT_c(\frac{i}{M}+n)} + w_{n,i}^{i} + jw_{n,i}^{q}. \quad (1)$$

식(1)에서 σ_{agc} 는 AGC(automatic gain control)에 의한 scaling factor 이며 n 은 샘플링된 시간인덱스, M 과 i 는 오버샘플링 인덱스이다. $p(nT_c)$ 는 반주기 사인함수 pulse shaping 을 의미한다. d_n^i, d_n^q 는 전송되는 데이터이며 w_n 는 정규분포를 갖는 잡음이다. 여기서 주파수 옵셋을 제거하기 위해 차등 신호 $r_n\, r_{n-1}^*$ 을 구하면 식(2)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} r_n r_{n-1}^* &= \sigma_{agc}^2 E_c e^{j(\phi_n-\phi_{n-1})}e^{j2\pi\Delta fT_c} \\ &+ \sigma_{agc}^2\sqrt{E_c}e^{-j\phi_{n-1}}e^{-j2\pi\Delta fT_c(n-1)}n_n \\ &+ \sigma_{agc}^2\sqrt{E_c}e^{j\phi_n}e^{j2\pi\Delta fT_c(n)}n_{n-1}^* + \sigma_{agc}^2 n_n n_{n-1}^*. \end{aligned} \quad (2)$$

차등신호를 구함으로써 시간에 따라 변하는 위상성분을 제거할 수 있다. 하지만 주파수 옵셋 $2\pi\Delta fT_c$ 만큼의 위상 차가 잔존하게 되는데 이것은 correlation 값에 절대값을 취함으로써 제거할 수 있다. PN(pseudo random)코드로 확산된 preamble 을 이용하여 프레임 시작 신호를 검출한다. 차등 수신신호와 preamble 의 correlation 값

Z_n 은 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{n,i} = \sum_{l=1}^{L} (r_{l+n,i} r^*_{l+n-1,i})(s_{l,i} s^*_{l-1,i}). \quad (3)$$

여기서 s_l 는 수신단에서 알고 있는 preamble 값이며 L 은 preamble 길이 이고, i 는 over-sampling index 이다. 하지만 식(2)와 같이 주파수옵셋에 해당하는 위상오류가 생긴다. 이것을 제거하기 이하여 식(3)에 절대값을 이용하여 위상오류를 제거할 수 있으며, 식(4)와 같다.

$$Z_{n,i} = \left| \sum_{l=1}^{L} (r_{l+n,i} r^*_{l+n-1,i})(s_l s^*_{l-1}) \right|^2. \quad (4)$$

식(4)에 의한 correlation 값은 식(5)와 같다.

$$Z_{n,i} = \sigma^4_{agc} E_c^2 L^2 + |w_z|^2. \quad (5)$$

여기서 w_z 는 correlation 후의 잡음이다.

III. 주파수 옵셋 추정

주파수 옵셋은 preamble 구간을 이용하여 data 를 제거한 후 차등신호를 이용하여 주파수 옵셋을 추정 할 수 있다. 차등신호는 식(2)와 같이 구할 수 있으며 정보를 갖고 있는 $e^{j\phi_n}$ 은 preamble 로 제거하여 주파수 옵셋과 잡음만 남게 된다. 잡음은 Averaging 으로 잡음의 분산을 줄일 수 있다. 하지만 chip 주기가 아닌 over-sampling 주기로 주파수 옵셋을 추정할 수 있다. Over-sampling 주기로 주파수 옵셋을 추정할 경우 over-sampling 된 만큼 추정에 이용할 신호가 늘어난다. 식(6)과 같이 추정할 수 있으며 추정된 값의 분산은 chip 주기 보다 $1/M$ 만큼 줄일 수 있다.

$$r_{n,i} r^*_{n-1,i} = \frac{1}{M} \sigma^2_{agc} (ME_c e^{j2\pi\Delta f T_c} + \sqrt{ME_c} e^{-j2\pi\Delta f T_c (n-1)} n_n + \sqrt{ME_c} e^{j2\pi\Delta f T_c (n)} n^*_{n-1} + \sqrt{M} n_n n^*_{n-1}. \quad (6)$$

저전력, 저가시스템을 위해 look-up table 없이 구현하기 위해 식(7)과 같이 선형화 시켜 간단하게 구할 수 있다.

$$2\pi\Delta \hat{f} T_c = \sin^{-1}\left(\frac{\mathrm{Im}[r_{n,i} r^*_{n-1,i}]}{\sigma^2_{agc} E_c}\right) \approx \frac{\mathrm{Im}[r_{n,i} r^*_{n-1,i}]}{\sigma^2_{agc} E_c}. \quad (7)$$

V. 시뮬레이션

여기서 사용한 프레임 동기를 이용한 ROC 곡선은 그림 1 과 같다. 그림 2 에서는 주파수 옵셋이 잔존하는 경우의 성능과 주파수 옵셋을 추정한 다음의 성능을 비교해 보았다. AWGN 채널과 differential detection 복조방식을 사용하였다.

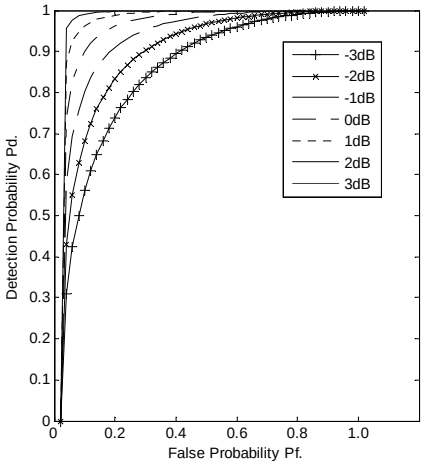

그림 1. Receiver Operating characteristic

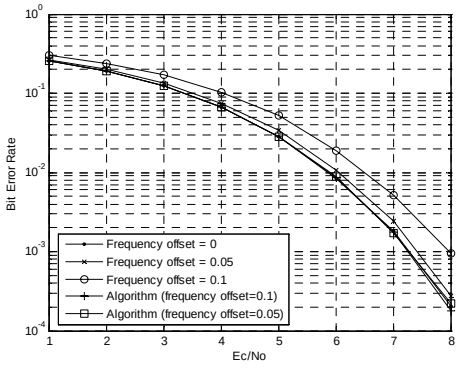

그림 2. 주파수 옵셋 보상 후의 성능분석

V. 결론

IEEE 802.15.4 시스템의 규격에 따라 주파수 오차가 큰 시스템에서의 프레임 동기화 기법 및 주파수 추정 기법을 제안하였다. 프레임 동기의 경우 완벽하게 주파수 오차성분을 제거 할 수 있었으며 주파수 옵셋 추정의 경우 Over-sampling 주기로 함으로써 추정에 의한 분산을 줄일 수 있었다.

참고문헌

[1] IEEE Std 802.15.4-2003 : Wireless Medium Access Contorl(MAC) and Physical Layer(PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs)